

# 常用金属材料的低温摩擦学研究进展

朱龙辉<sup>1</sup>, 焦智超<sup>1</sup>, 石焯然<sup>1</sup>, 周青<sup>1</sup>, 任越<sup>2</sup>, 王海丰<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518063)

(2. 比亚迪股份有限公司, 广东 深圳 518118)

**摘要:** 近年来, 航空工业、低温超导、氢能源动力等领域的迅速发展推动了低温环境下装置运行可靠性需求的增加。低温会引起润滑剂的失效以及金属机械性能的恶化, 由此引发的润滑问题日渐凸显, 金属材料将面临低温下干摩擦的严峻服役环境。因而, 材料卓越的摩擦磨损性能是确保机械设备在低温环境下长期稳定运行的关键因素。本文阐述了低温下润滑方面面临的挑战, 包括低温润滑失效以及金属韧性改变; 介绍了目前金属材料常见的低温摩擦服役环境; 重点介绍了低温下性能优异的钢材料、钛合金、铝合金和多主元合金材料, 并展望了该领域未来发展趋势。

**关键词:** 低温; 金属材料; 磨损

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)01-0254-09

近些年来, 随着航空事业、低温超导、氢能源动力等领域的迅速发展, 越来越多的装置需要在低温环境下运行<sup>[1-2]</sup>, 由此引发的润滑问题日益严重。一方面, 大多数液体润滑剂在低温下粘度增大, 会逐渐失去润滑作用, 使得机械部件不得不面临干摩擦的严峻困境<sup>[3]</sup>; 另一方面, 金属材料在低温下发生脆韧转变会导致机械性能急剧恶化。与此同时, 在低温下的各种严苛复杂的服役环境, 如低温真空、冷热交替等对材料的综合性能提出了挑战。如破冰船表面材料<sup>[4]</sup>面临着冰面物理挤压、冰面的摩擦磨损、零下的环境温度以及海水的腐蚀等环境因素的侵蚀。因此需要找到具备优良的力学性能、在低温下的抗摩擦磨损性能以及抗腐蚀能力的结构材料以应对复杂的服役环境。

目前对低温金属材料的摩擦学性能研究仍停留在较低水平, 低温摩擦领域的基础研究十分匮乏, 亟待进一步开发出能满足低温下具有优异耐磨性能的金属材料以满足对材料日益增长的低温耐磨需求。

## 1 失效方式

为开发出在低温下具有优异耐磨性能的金属材料, 首先需要了解低温下材料失效的形式, 这对于在低温下耐磨金属材料设计具有重要的科学和技术指导意义。

### 1.1 低温润滑失效

在常温下, 液体/固体润滑是最常见的润滑形式, 但是在低温下液体/固体润滑剂的润滑性能恶化, 对金属材

料部件的性能提出了巨大的挑战。了解低温下润滑剂的失效可以帮助我们更好地理解润滑的机理。本节将从油脂润滑剂和固体润滑剂两方面简要介绍润滑剂低温润滑失效的形式。

通常, 油脂润滑剂会在金属之间形成一层油膜, 通过避免金属传动部件之间的相互直接接触从而达到减摩擦的目的。由于油脂的润滑性能与其粘度有关, 随着温度的降低大部分油脂润滑剂的粘度增大, 流动性变差而难以发挥润滑作用<sup>[5]</sup>。因此工作温域较宽的固体润滑剂成为在低温下进行润滑的较优选择。常见的固体润滑剂有石墨、MoS<sub>2</sub>及类金刚石薄膜。石墨与MoS<sub>2</sub>独特的层状结构使其层间相互作用力较低, 在受力时易发生层间滑移以实现润滑效果<sup>[6]</sup>, 但是这2种润滑剂的环境适应能力差, 石墨晶体在真空干燥环境下摩擦力剧增<sup>[7]</sup>; 而MoS<sub>2</sub>在潮湿氧化环境中表现出高摩擦低使用寿命<sup>[8]</sup>。类金刚石薄膜虽然在潮湿环境中性能优秀, 但存在热膨胀系数不匹配的问题<sup>[9]</sup>, 当温度跨度过大时, 类金刚石薄膜易于与基体之间失配, 在使用过程中易于脱落、使用寿命缩短。

总之, 无论是油脂润滑还是固体润滑, 都很难满足在超低温下长时间服役的要求。油脂润滑的低温失效与固体润滑剂的使用环境限制都无法满足大多数低温场景下的使用。因此低温润滑的失效对金属的本征摩擦性能提出了很高的要求。

收稿日期: 2024-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(52175188); 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515012378); 陕西省重点研究发展计划(2023-YB-434); 辽宁省航空发动机材料摩擦学重点实验室开放基金(LKLAMTF202301); 核反应堆系统设计技术重点实验室基金

作者简介: 朱龙辉, 男, 2001年生, 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518063, E-mail: zhulonghui@mail.nwpu.edu.cn

## 1.2 金属材料的韧脆转变

除了在低温下润滑失效之外,低温下金属性能的恶化同样也对金属的摩擦性能有着恶劣的影响。在温度降低到一定程度时,金属材料会发生由韧性状态转变为脆性状态的现象,即低温韧脆转变。在脆韧转化温度之上,材料具有较好的韧性;低于临界温度时,则会由韧性突然转变为脆性,几乎丧失了塑性变形能力,使金属材料低温下的力学性能和摩擦学性能显著恶化。据一份描述西伯利亚雅库特冬季采矿工具行为的报告称:“钢制工具变得如此脆,以至于像火柴棍一样折断”<sup>[10]</sup>。通常,低温韧脆转变出现在体心立方金属、部分密排六方金属和金属间化合物等大多数合金体系中,面心立方金属在极低温时同样存在韧脆转变。以钢材料为例,通过在钢中加入镍、锰等可使脆性转变温度降低,随着含碳、磷元素的增加,脆性转变温度明显升高。

低温下润滑剂的失效以及金属的性能恶化导致金属材料将面临极端环境下干摩擦的服役环境,这使得寻找一种可以在低温下稳定工作的金属材料成为必要。目前已经有许多学者研究不同材料以及实验方法以获得在低温下耐磨的合金。常见的金属材料有钢材料、铝合金、钛合金、多主元合金(multi-principal element alloy, MPEA)等。本文首先总结了常见的低温摩擦设备,并按照不同的使用工况进行分类;随后从不同种类的金属材料出发,详细介绍了近期新颖的低温耐磨材料研究成果,以期相关从业者可以快速了解该领域。

## 2 低温摩擦实验方法

摩擦磨损实验的目的是研究材料在实际的工作条件下的特征与变化,揭示在摩擦过程中各种因素对性能的影响,从而确定最合适的设计参数。

摩擦现象的复杂性决定了繁多的实验方法与实验设备,因此越来越多的国家和组织开始重视实验方法的标准化。在此基础上,根据摩擦磨损的实际接触情况和运动方式的不同,可以设计出适用于不同条件下的摩擦磨损试验机来进行各种摩擦机理的研究。

试件之间的运动方式分为纯滑动、纯滚动或者伴随滑动。试件的运动有的采用旋转运动,有的采取往复运动。试件的接触形式有点接触、线接触和面接触。通常点接触的单位面积压力最大可达5000 MPa,适用于需要较高接触应力的实验如胶合磨损或接触疲劳磨损;线接触的接触应力可以达到1000~1500 MPa,适合用于粘着磨损实验和接触疲劳磨损实验;面接触的接触压力较低,一般为50~100 MPa,通常用于磨粒磨损实验。

当前研究广泛采用球-盘式摩擦磨损试验机来评估金属材料的摩擦学性能。在实验过程中通过施加力以及控制运动来模拟材料之间的运动,并通过控制参数来模拟不同工况,进而根据磨损率、摩擦系数等数据评估材料的耐磨性能和摩擦学特性。

对于在低温下进行的金属材料摩擦实验是在以上实验装置的基础上额外增加低温装置来实现低温环境,从而模拟材料在极端环境下的工况,测试在不同低温温度下材料的摩擦学性能。当前,有关金属材料的低温摩擦学研究仍十分匮乏。由于低温摩擦装置的限制,多数研究工作的测试温度难以低于-60℃。低温装置大多依靠低温介质热传递来实现,表1列出了不同环境与常见低温介质的温度。本文低温与室温和高温相对应,泛指零摄氏度以下温度区间,并在不同金属材料中筛选出近期的摩擦磨损研究成果进行汇报。

当前低温摩擦装置根据制冷介质的不同可分为低温液体介质、低温气体介质及低温真空介质3类,它们装置内部的结构简图如图1所示<sup>[11]</sup>。根据环境介质的不同,材料的摩擦学性能也会受到相应的影响。

### 2.1 低温液体介质

为了实现低温下的摩擦学研究,通常将试样直接浸泡在液体介质中,即可在液体沸点的温度下进行摩擦磨损实验,常用的介质有液氦、液氢、液氮、液氧等。该方法的成本较为低廉,实现较为简单,但是由于摩擦热的存在,容易在两摩擦副之间引发液体介质沸腾,形成蒸汽膜导致热量传递的效率降低,这一现象在液氮之中尤为明显。且由于液体的沸点是固定的,因此只能在孤立的温

表1 不同环境与常见低温介质的温度

Table 1 Temperature of different environments and common low temperature media

Type	Kelvin temperature/K	Celsius temperature/°C
Room temperature	296	23
Solid carbon dioxide	195	-50
Liquid natural gas (LNG)	111	-162
Liquid oxygen (LO <sub>2</sub> )	90	-183
Liquid nitrogen (LN <sub>2</sub> )	77	-196
Liquid hydrogen (LH <sub>2</sub> )	20	-253
Liquid helium (LHe)	4.2	-269
Absolute zero	0	-273

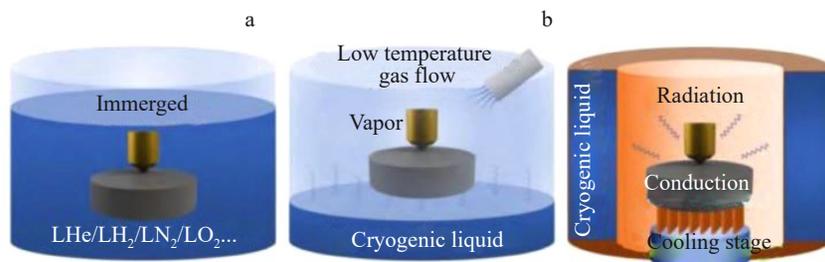


图1 低温摩擦测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagrams of cryogenic friction testing device: (a) cryogenic liquid medium; (b) cryogenic gas medium; (c) cryogenic vacuum medium<sup>[11]</sup>

度点进行实验,无法对环境温度进行较为精准的调控。此外,由于低温介质与摩擦副表面会发生化学相互作用可能导致表面化学变化,这会改变材料表面相组成使摩擦实验出现偏差<sup>[12]</sup>。

事实上,早在 1958 年就有用低温液体作为低温介质进行摩擦学研究的例子。Wisander 等<sup>[13]</sup>通过将填充的聚四氟乙烯组合物置于球-盘式摩擦试验机并利用液氮浸没将其冷却进行摩擦学测试,发现其摩擦系数较低(在液氮中摩擦系数可低至 0.06),同时磨损量也较小,摩擦磨损性能基本不受滑动速度的影响,与传统密封组件所用的碳钢相比有明显优势。

1989 年, Iwabuchi 等<sup>[14]</sup>使用如图 2 所示装置分别在 293、77 和 4 K 测试了金属与铜、不锈钢、环氧树脂的摩擦性能。摩擦力通过粘贴在放置于移动臂中间的圆环上的应变片测量。77 K 下的实验通过在每个臂上安装试样并加载后,将液氮倒入低温恒温箱中冷却 5 min,然后在液氮中开始滑动。在 4 K 下进行实验时,将样品在液氮中预冷 20 min,并将液氮倒入瓶中。试样浸入液氮 5 min

后开始滑动。在微动过程中,保持液氮和液氦浸没样品以保持温度恒定不变。实验揭示了在不同条件下温度对摩擦性能的影响规律。由于低温液体介质的便捷可操作性较强,对实验仪器气密性要求较低,此后大多研究人员使用低温液体介质作为冷源并以此开展摩擦学研究。

### 2.2 低温气体介质

低温气体介质方法是通过低温气体热传递或者液体汽化的方法来降低试样表面的温度,通过控制气体的流量或者喷溅液体的体积实现对环境温度的控制。与低温液体介质相比较,低温气体介质的测试温度不再是单一的低温液体的沸点,而是高于沸点的一定温度范围。同样的,介质的化学性质也可能会影响摩擦副的表面状态,因此一般选取惰性气体(如液氮、液氦)来作为传热介质。但是装置内部气体交换对装置的密封性和内部气氛控制提出了较高要求,否则可能产生诸多问题,如大气中水蒸气进入导致的表面结冰、氧气进入导致的氧化以及气氛控制不合理导致的局部温度不均匀等。

尉成果等<sup>[15]</sup>通过低温氮气作为环境介质自主研发了低温/宽温域关节轴承试验机和自润滑关节轴承。该轴承试验机可以调节参数模拟在真实服役中可能遇到的环境,通过控制低温轴承试验机保温箱内部液氮的量来调节温度。由此尉成果开展了 113~323 K 宽温域范围内的摩擦磨损试验,分析了关节轴承摩擦系数和磨损量的影响规律及机理,补全了低温关节轴承的设计依据和摩擦系数、使用寿命等相关数据,为低温风洞中关节轴承的设计、研制和使用提供依据。

低温气体也会对摩擦实验带来温度之外的影响。兰州物理化学研究所的 Zhu 等<sup>[16]</sup>在研究低温高真空环境下钢材的摩擦表现时发现钢的表面出现变色现象。其低温下的摩擦实验是在外接低温真空设备的球-盘式摩擦试验机中进行的,当真空度低于  $5 \times 10^{-3}$  Pa 时开始降温。随着温度的变化,真空环境下剩余的微量气体分子对钢材表面的物理性质产生了影响,如图 3 所示。图中钢表面呈现出蓝紫色,且在升温过程中(140~280 K)钢表面颜色变化最为明显。通过使用质谱仪实时监测真空室内

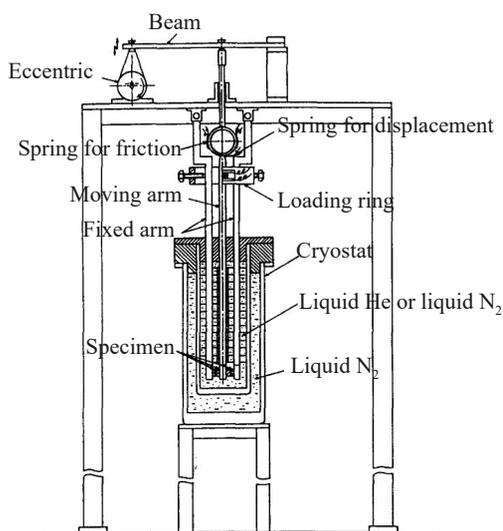


图2 低温摩擦测试试验台示意图

Fig.2 Schematic diagram of low temperature friction test rig<sup>[14]</sup>

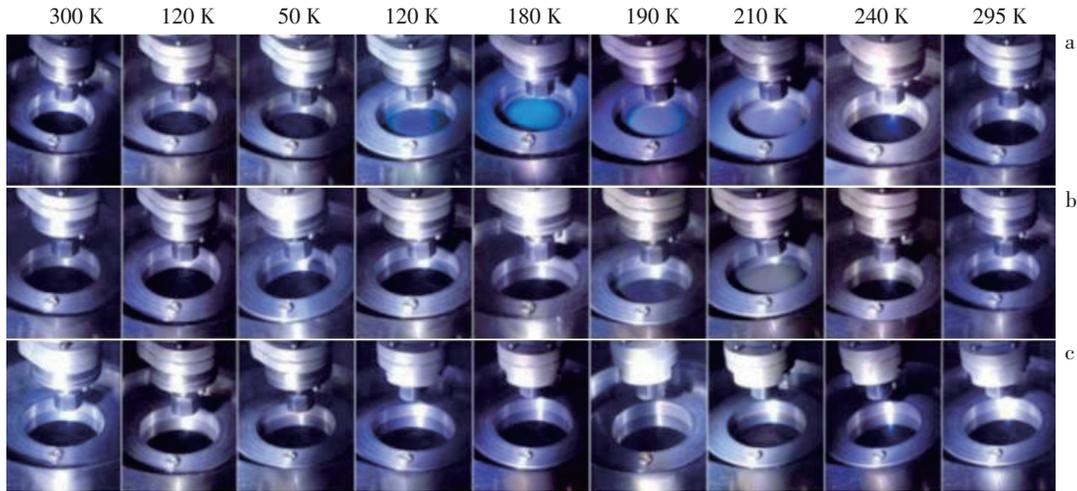


图3 9Cr18钢在3个加热和冷却阶段的表面颜色变化

Fig.3 Surface color changes of 9Cr18 steel in three heating and cooling stages: (a) the first time; (b) the second time; (c) the third time<sup>[16]</sup>

气氛含量,证实了这种颜色变化是由真空设备中微量的水蒸气造成的,同时影响着钢材料表面摩擦学行为。研究发现摩擦过程中水分子的冷凝使钢/钢摩擦副的耐磨性提高,并且通过主动控制气氛中氮气和氧气的含量可以进一步降低磨损。

### 2.3 低温真空介质

由于低温液体或气体的存在,可能会引起介质含量的变化或摩擦界面的转变。因此,需要反复更换所需的测试气体和含量监测,以保证低温下气体环境的一致性。此外,气体介质的物理性质(如热导率等)会影响材料在低温下的摩擦学性能。而真空环境,尤其是超高真空环境,可以在很大程度上消除环境介质对摩擦试验结果的干扰。然而,在高度真空下缺乏温度传导介质,仅能通过导热和辐射方式传热,制冷功率有限,因此在高速下进行的摩擦试验结果可能是不准确的。

2020年清华大学Cui等<sup>[17]</sup>在低温真空下对聚合物基

复合材料进行了测试,其自制的低温摩擦设备如图4所示。其设计最低温度为-100℃,真空度为 $5 \times 10^{-5}$  Pa。充满液氮的水槽并不与摩擦副直接接触,而是通过热辐射传热。真空腔室温度由加热灯泡控制并由转盘附近的热电偶测量(图中未画出)。发现其在宽温域内保持摩擦系数小于0.1,并通过表征手段证明了转移膜的生成,解释了聚合物材料在低温下摩擦系数与磨损率的特点。

目前,低温摩擦学的评价多集中于低温液体介质,测试的温度点不连续。而在实际工况当中,由于涉及真空、气体环境和交变温度等多种场景,这将造成测试结果与实际服役工况的差异。因此需要结合新型制冷技术设计探索新的低温实验测试方法与手段,进一步推动低温摩擦学研究的发展。

### 3 金属材料的低温摩擦学性能

在低温环境中,金属材料的选择至关重要,许多金属材料在低温下表现出良好的机械性能与摩擦学性能,因

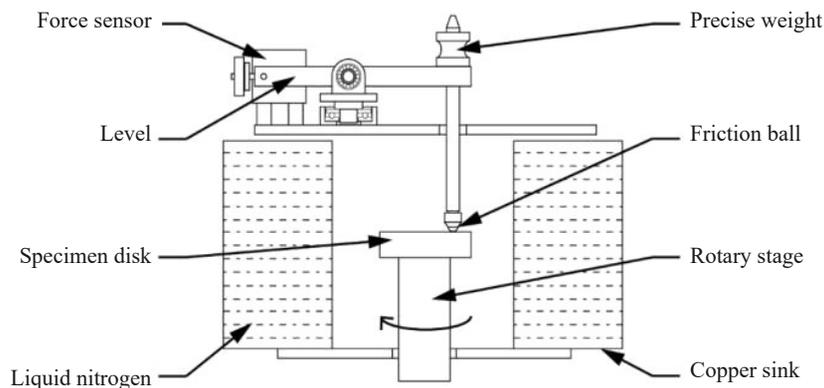


图4 低温真空下进行摩擦测试的装置简图

Fig.4 Schematic diagram of the tribometer for tribotests in vacuum and low temperature<sup>[17]</sup>

此被广泛应用于航空航天、低温工程和极地航行等领域。如在液化天然气工业中不锈钢被用于制造储存罐和输送管道,以确保安全和可靠的运输;铝合金在航空航天领域中被广泛应用于制造飞机机身和发动机零部件等;钛合金可以用于制造航空发动机零部件、航天器结构和海洋平台设备,以承受极端温度和压力条件。

尽管在低温环境下有多种金属材料可供选择,但钢、铝合金、钛合金和高熵合金因其在低温条件下表现出更优异摩擦学特性逐渐成为学术界和工业界的研究重点,并展现出更广阔的应用前景,如可以支持在不同的低温环境下工作的低碳锰钢、中镍钢和镍铬奥氏体钢。本部分将针对近期较为新颖的研究成果,对不同的金属材料性能以及加工方法进行汇总综述,以期使读者可以快速了解近期金属材料在低温下的摩擦学研究进展。

### 3.1 钢材料在低温下的摩擦磨损性能

钢是对含碳量质量分数介于 0.02% 至 2.11% 之间的铁碳合金的统称。根据用途的不同,钢的化学成分中含有不同的合金元素,比如添加了锰和镍的钢在低温下有着更好的使用性能。如今,钢以其低廉的价格、可靠的性能成为世界上使用最多的材料之一,是建筑业、制造业和人们日常生活中不可或缺的成分。可以说钢是现代社会的物质基础。为了进一步扩大低成本钢材料的应用,研究钢材料在低温下的性能势在必行。

低碳中锰钢具有优异的成形性、焊接性、强度和韧性,是汽车工业结构件和先进工程厚钢板的重要合金<sup>[18]</sup>。经奥氏体逆转处理(austenite reversion treatment, ART)<sup>[19]</sup>后,它们呈现出超细回火马氏体和相当数量的亚稳奥氏体的双相组织,强度和塑性得到了额外的提高<sup>[20]</sup>。Yan 等<sup>[21]</sup>研究了 ART 处理后的中锰钢(富奥氏体钢)在 20、0、-50 和 -120 °C 下的摩擦磨损行为。结果表明,马氏体钢和富奥氏体钢的耐磨性随磨损试验温度的降低而提高,马氏体的硬度随温度降低而升高,但是其冲击韧性急剧下降,富奥氏体钢中亚稳奥氏体产生的应变硬化和韧性增强极大地降低了低温下的磨损体积。与马氏体钢相比,主要的磨损机制从犁沟转变为切削。这一研究为开发低温应用的初始硬度相对较低的新型耐磨钢提供了依据。

通过对钢成分进行调控,可以在一定程度上改善其在低温下的使用性能。为了提高低温船舶用钢的低温摩擦磨损性能,上海海事大学的孙士斌等<sup>[22]</sup>设计并制备了 4 种新型不同 Si 含量(0.3%、0.6%、0.9% 和 1.2%)的船用低温高强钢,研究并分析了其摩擦磨损性能。结果显示:在恒定低载荷(20 N)和恒定低滑动速率(10 mm/s)条件下,该新型船用钢板的磨痕表面硬度明显高于磨损前,摩擦机理以粘着磨损、疲劳磨损为主,部分区域发生氧化磨损,磨屑被挤压产生加工硬化层。这是由于 Si 的添加起

到了固溶强化以及相变强化的综合作用,显著提高了钢材料的摩擦磨损性能以及硬度。其中, Si 含量为 1.2% 的船用低温钢在 20 和 -10 °C 下均表现出优异的摩擦磨损性能,平均摩擦系数分别为 0.41(20 °C)、0.38(-10 °C);磨损量分别为  $1.695 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (20 °C)、 $2.097 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (-10 °C)。随着 Si 含量的上升,使得经过两相区调质热处理的船用低温钢金相组织不同程度细化,并且使得固溶强化不断加强,磨损量降低,钢材在低温条件下的耐磨性有所提高。

### 3.2 钛合金在低温下的摩擦磨损性能

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能好和低温力学性能优异等特点,是航空航天领域应用最广泛的材料之一,在火箭发动机的贮箱、低温液体贮箱、紧固件、泵叶轮、支架等低温部件应用广泛<sup>[23-25]</sup>。然而,塑性剪切抗力较低以及表面氧化物的保护作用较弱<sup>[26]</sup>导致钛及其合金的摩擦学性能较差,严重限制了钛合金的进一步应用。例如,在钛合金构件的实际应用过程中,摩擦副表面的氧化膜会发生磨损损失<sup>[27]</sup>从而失去保护作用。为了提高钛合金的耐磨性,人们对其进行大量改性处理,如渗氮<sup>[28-29]</sup>,涂层处理<sup>[30]</sup>,掺杂<sup>[31-32]</sup>等。得益于多种改性手段,截至目前已经涌现出了一批在低温领域摩擦性能表现优良的钛合金材料。

中国石油大学的 Wang 等<sup>[33]</sup>测试了 Invar36 低膨胀镍钛合金在低温下的性能。实验结果表明 Invar36 合金具有优异的摩擦学性能,其摩擦系数(coefficient of friction, COF)在 20~-78 °C 范围内逐渐减小。随着温度降至 -196 °C, COF 也随着温度下降而急剧下降,至 -196 °C 时达到最小值。此外,在相同条件下对一种商业轴承级材料(G95Cr18 钢)进行了测试和比较,结果表明 Invar36 合金具有比 G95Cr18 钢更好的摩擦学性能,在 -196 °C 时,其磨损率比 G95Cr18 钢低 55.43%。进一步的模拟对比表明,由于其极低的热膨胀系数,在低温条件下, Invar36 合金比 G95Cr18 钢具有更高的韧性和强度。该研究提供了 Invar36 钛合金在不同温度和载荷下对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球的摩擦学数据,为开发出低温具有高耐磨的钛合金发展提供了重要的理论指导。

Ti 基块体金属玻璃复合材料通常具有优异的强度、塑性和韧性,因而成为低温工程应用的潜在理想选择之一<sup>[34]</sup>。然而,关于其磨损行为的研究仍然较为稀缺。Ren 等<sup>[35]</sup>研究了 Ti 基块体金属玻璃复合材料在 113 K 的低温下的耐磨性,在低温下 Ti 基金属玻璃复合材料的耐磨性大大提高。 $\text{Ti}_{47.2}\text{Zr}_{33.9}\text{Cu}_{5.9}\text{Be}_{13}$  金属玻璃复合材料的低温摩擦性能如图 5 所示。图 5a 展示了其在不同温度下的摩擦系数,随着温度的降低,动摩擦因数略有降低;在图 5b 中,当温度从 233 K 降低到 113 K 时,磨损率从  $5.95 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  单调降低到  $3.12 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ,磨

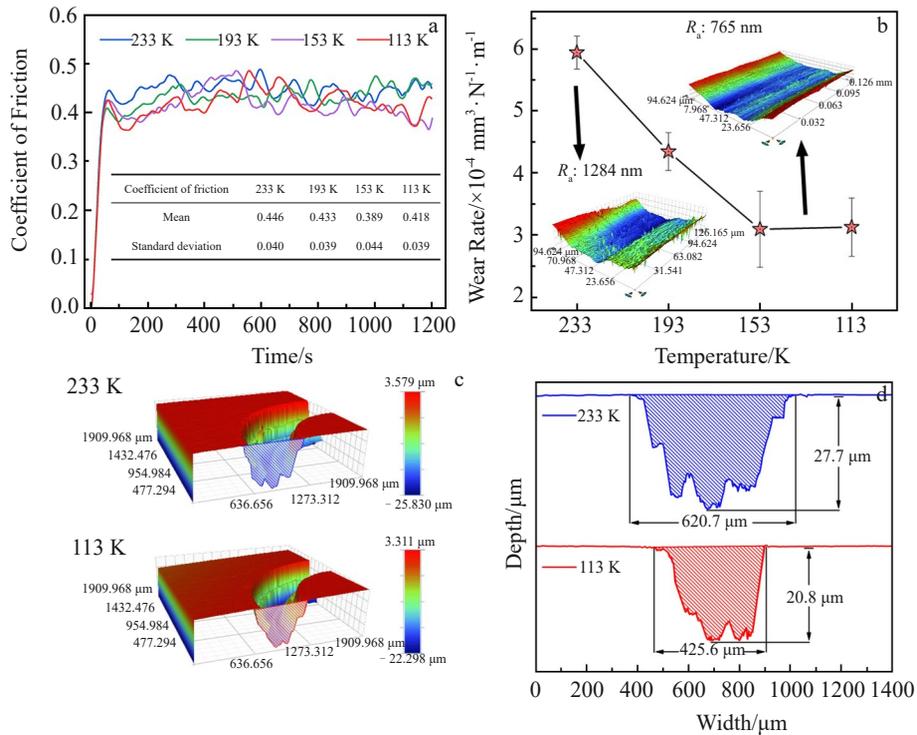


图5 摩擦系数随滑动时间的变化曲线,不同深冷温度下磨损率的变化曲线与233和113 K下磨损表面的三维形貌和横截面积  
Fig.5 Coefficient of friction versus sliding time (a); variation curves of wear rate with cryogenic temperatures (b); three-dimensional morphologies (c) and cross-sectional areas (d) of worn surfaces at 233 and 113 K<sup>[35]</sup>

损率降低高达47.6%。由磨痕的三维形貌(图5b)可知在低温下测试的磨损表面呈现更光滑和轻微的表面,粗糙度更低。图5c展示了从3D轮廓仪获得的磨损轨迹的整体3D视图。与233 K相比, Ti<sub>47.2</sub>Zr<sub>33.9</sub>Cu<sub>5.9</sub>Be<sub>13</sub>金属玻璃复合材料在113 K下摩擦时具有更窄、更浅的磨痕。研究结果证明该Ti基块体金属玻璃复合材料在较低的低温下具有更好的耐磨性。

### 3.3 铝合金在低温下的摩擦磨损性能

与金属钛相比,铝合金有着更低的密度,并且添加一定合金化元素后可达到较高强度,其比强度接近高合金钢而比刚度超过钢,具有良好的铸造性能和塑性加工性能<sup>[36]</sup>。因此在航空航天、交通运输、建筑、机电等方面有着广泛的应用。此外,低温环境下可以同时改善铝合金的硬化和塑性能力<sup>[37-38]</sup>,可以克服其室温成形性差的问题,因此也被视为具有优异低温摩擦的理想材料之一。

中国科学院北京物理与化学研究所低温技术重点实验室的Weng等<sup>[39]</sup>研究了15% SiC颗粒/2009Al铝基复合材料在室温和低温滑动磨损条件下的亚表面变形和磨损行为。结果表明,与室温相比,低温下的滑动实验在亚表层引起了更大的塑性变形。这是因为在低温下铝基体塑性增加以及SiC颗粒脆性增加导致其对铝合金基体变形的阻碍作用降低。在低温下进行滑动实验的复合材料的磨损率显著降低。磨损表面在低温滑动后具有较低的表

面粗糙度和较高的表面均匀性。磨损机制由室温下严重的氧化磨损、粘着磨损和剥层磨损转变为低温滑动下轻微的剥层磨损和开裂特征。低温滑动后的变形层起到了纳米晶加工硬化层的作用,低温下加工硬化率和位错密度增加,抑制了裂纹的产生,相应地提高了材料的磨损性能。这项研究为通过在低温环境下自适应形成纳米硬化层的方法来设计高表面性能的铝基复合材料提供了一种新的策略。

铝合金超低温成形过程中温度分布不同,模具与铸件的界面之间接触压力随材料流动不断变化,接触面之间的摩擦形式也会随之改变。Gao等<sup>[40]</sup>研究了高压低温下铝合金的减摩机理。结果表明,COF随着压力的增加先增大后减小。温度的降低以及接触面压力的增加,均有利于铝合金组织的晶粒尺寸的减小,导致粘着摩擦或犁沟摩擦减少,从而导致在高压和低温下的COF较低;较高的温度和压力则增加了粘着力,容易引起黏着磨损的发生,不利于延长模具的使用寿命。可见精细变形微结构的形成增强了表面材料的塑性和抵抗变形的能力,该工作不仅有助于推进多尺度摩擦模型的建立,而且为低温成形仿真和工艺参数优化提供了基础。

### 3.4 多元合金在低温下的摩擦磨损性能

传统合金通常是以1种或2种金属元素作为基元,向其中添加金属或者非金属元素以达到强化金属使用性能

的目的。随着工业领域的快速发展,传统合金的研发陷入瓶颈。近年来,由我国台湾科学家 Yeh 教授<sup>[41]</sup>和英国学者 Cantor 教授<sup>[42]</sup>提出了 1 种新型多主元合金设计理念,其颠覆了传统合金由单一主元构成的设计理念,为合金材料的成分组成、组织调控与性能设计带来了广阔的开发空间。与传统合金相比,多主元合金由于兼具高强度、高硬度、抗磨损性能与耐腐蚀性能受到了人们的广泛关注。多主元合金<sup>[43]</sup>的设计理念使得合金成分呈现爆发式增长,极大拓宽了金属材料的成分空间,将人们的关注点从相图的角落位置转到广阔的中间区域<sup>[44]</sup>,而复杂的成分赋予了合金组织与性能上诸多的可能性,开启了新型多主元合金的研究热潮。

CoCrNi 多主元合金由于在低温下没有明显的韧脆转变并且在很宽的温度范围内都有很好的强塑性<sup>[45]</sup>,已被公认为低温应用的 fcc 多主元合金的典型代表体系<sup>[46-48]</sup>。Ren 等<sup>[49]</sup>研究了 CoCrNi 多主元合金在低温下的摩擦学行为,研究表明 CoCrNi 多主元合金在温度从 273 K 降低到 153 K 时表现出显著增强的耐磨性,超过了低温奥氏体钢。通过显微观察和原子模拟,明确了影响 CoCrNi 低温耐磨性能的变温组织特征和变形机制。在深冷条件下,显著的晶粒细化和较深的塑性区导致了向表面以下扩展的组织梯度,这可以容纳大量的滑动变形,这与 273 K 下的应变局部化和分层形成了直接的对比。同时,与温度相关的深冷变形机制(堆垛层错网络与相变)也为亚表层材料提供了额外的强化和增韧。这些特性使得 CoCrNi 合金在低温条件下特别耐磨损。图 6 所示为奥氏体合金钢与 CoCrNi 基高熵合金在不同温度下磨损率对比,可以看出奥氏体合金钢在低温下的摩擦磨损性能并不突出,对于某些成分的合金钢,低温甚至会增大其磨损率(06Cr19Ni10 钢)。而 CoCrNi 多主元合金不仅在常温下有着较低的磨损,在低温下其耐磨性能大大提高,与室温相比降低了 44%,是在低温下性能优异的金属材料。

MPEA 具有极高的构型熵,由 5 种及以上主元组成

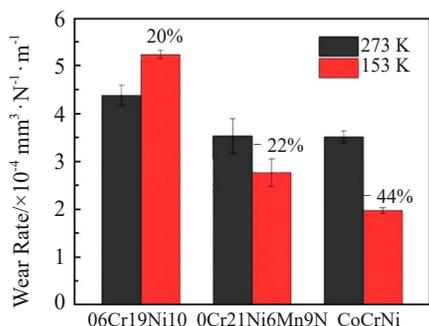


图 6 奥氏体合金钢与 CoCrNi 多主元合金在不同温度下的磨损率  
Fig.6 Wear rates of commercial austenitic stainless steels and CoCrNi MPEA<sup>[49]</sup>

的 MPEA 被称为高熵合金 (high-entropy alloys, HEAs)<sup>[50-52]</sup>。Geng 等<sup>[53]</sup>研究了单相 CoCrFeNiMn 高熵合金和 CoCrFeNiAl 高熵合金在低温真空环境下的摩擦学行为,结果表明 173 K 下单相 CoCrFeNiMn 高熵合金和 CoCrFeNiAl 高熵合金均有高的耐磨性,其中 CoCrFeNiAl 高熵合金磨损率可低至  $1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。并且在摩擦过程中的接触应力以及瞬时温度的提高促进了 HEAs 的晶粒细化,这更进一步使得 HEAs 的耐磨性提高。这项工作进一步通过多种表征手段研究了在 2 种接触条件下的磨损诱导微观组织演变,填补了低温下高性能高熵合金摩擦学行为的空白,为进一步优化高熵合金在低温下的耐磨性提供了指导。

## 4 总结与展望

本文介绍了金属材料低温摩擦研究现状,包括低温摩擦学的实验技术以及目前新颖的金属材料研究进展。首先概述了金属材料在低温下服役所遇到的困境,包括低温润滑失效以及低温脆韧转变。对于材料在低温下的摩擦学试验环境进行了总结和讨论,分别介绍了低温液体介质、低温气体介质和低温真空介质环境的优缺点。根据金属材料的种类不同,分别介绍了低温下的钢材、钛合金材料、铝合金材料以及多主元合金材料的前沿成果,其中多主元合金作为新兴领域,在低温下表现出了优异的耐磨性,是未来最具潜力的新型材料之一。

随着航空事业、低温超导、氢能源动力相关技术的不断发展,低温的应用会越来越广泛,由此引发的润滑问题仍需要进一步研究。就目前而言低温润滑仍有若干问题需要解决与完善。首先,由于大部分低温摩擦实验是在低温液体介质中进行的,导致测试的温度点比较单一。然而实际使用过程中的外界环境复杂多变,测试环境与实际使用环境存在差异。因此需要开发更加契合使用环境的实验方法;其次,现有的低温实验表征手段大多在室温下进行,难以获得低温下材料的实时变化信息;最后,低温摩擦学的诸多研究仍不够系统,其机理部分的研究还不够深入。

综上所述,金属材料低温摩擦研究领域虽然取得了显著进展,但仍存在诸多挑战和未知。未来的研究应着力于开发更为适用的实验方法和表征手段深入探讨低温摩擦机理,进一步研究不同材料在不同因素影响下的摩擦行为,以推动具有优异耐磨性金属材料的发展和应用。

## 参考文献 References

- [1] Sapi Zsombor, Butler Richard. *Cryogenics*[J], 2020, 111: 103190
- [2] Li Yu, Li Wei, Wang Bingjun et al. *Science Bulletin*[J], 2023, 68(12): 1243
- [3] Wen Shizhu(温诗铸), Huang Ping(黄平). *Principles of Tribology*

- (摩擦学原理)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012
- [4] Wang Dongsheng(王东胜), Chang Xueting(常雪婷), Wang Shiyue(王士月) *et al. Journal of Chongqing University*(重庆大学学报)[J], 2018, 41(6): 66
- [5] Zhu Yongqi(朱永琪), Li Hongxuan(李红轩), Ji Li(吉利) *et al. Tribology*(摩擦学报)[J], 2023, 43(9): 1083
- [6] Shi Yeran, Wang Wan, Zhou Qing *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2024, 16(22): 29453
- [7] Menezes P L, Rohatgi P K, Omrani E. *Self-Lubricating Composites*[M]. Berlin: Springer, 2022
- [8] Gradt Thomas, Schneider Thomas. *Lubricants*[J], 2016, 4(3): 32
- [9] Hübner W, Gradt T, Schneider T *et al. Wear*[J], 1998, 216(2): 150
- [10] Edward Jay Epstein. *The Rise and Fall of Diamonds: the Shattering of a Brilliant Illusion*[M]. New York: Simon and Schuster, 1982
- [11] Cui Wenyan, Chen Hongzhan, Zhao Jianxun *et al. International Journal of Extreme Manufacturing*[J], 2023, 5(2): 022004
- [12] Theiler Géraldine, Gradt Thomas. *Cryogenics*[J], 2018, 93: 1
- [13] Wisander D W, Maley C E, Johnson R L. *ASLE Transactions*[J], 1959, 2(1): 58
- [14] Iwabuchi A, Honda T, Tani J. *Cryogenics*[J], 1989, 29(2): 124
- [15] Yu Chengguo(尉成果), Chen Wanhua(陈万华), Liang Bo(梁波) *et al. Scientia Sinica Technologica*(中国科学)[J], 2020, 50(6): 775
- [16] Zhu Yongqi, Li Hongxuan, Li Fengying *et al. Tribology International*[J], 2024, 191: 109104
- [17] Cui Wenyan, Raza Khalid, Zhao Zhijun *et al. Tribology International*[J], 2020, 152: 106569
- [18] Lee Y K, Han J. *Materials Science and Technology*[J], 2015, 31(7): 843
- [19] Wang C, Cao W, Shi J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 562: 89
- [20] Srivastava A K, Jha G, Gope N *et al. Materials Characterization*[J], 2006, 57(2): 127
- [21] Yan X C, Hu J, Wang L Y *et al. Wear*[J], 2021, 486–487: 204116
- [22] Sun Shibin(孙士斌), Yang Ti(杨剔), Wang Dongsheng(王东胜) *et al. Materials Protection*(材料保护)[J], 2020, 53(4): 15
- [23] Banerjee D, Williams J C. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(3): 844
- [24] El-Tayeb N S M, Yap T C, Venkatesh V C *et al. Materials & Design*[J], 2009, 30(10): 4023
- [25] Xu Wei, Lu Xin, Tian Jingjing *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2020, 41: 191
- [26] Molinari A, Straffelini G, Tesi B *et al. Wear*[J], 1997, 208(1–2): 105
- [27] Liu Yong(刘勇), Ye Zhuyu(叶铸玉), Yang Dezhuang(杨德庄) *et al. Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报)[J], 2006, 38: 335
- [28] Courant B, Hantzpergue J J, Benayoun S. *Wear*[J], 1999, 236(1–2): 39
- [29] Belkin P N, Kusmanov S A, Zhironov A V *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(10): 1027
- [30] Heinrich G, Grögler T, Rosiwal S M *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 1997, 94–95: 514
- [31] Schmidt H, Schminke A, Rück D M. *Wear*[J], 1997, 209(1–2): 49
- [32] Allen C, Bloyce A, Bell T. *Tribology International*[J], 1996, 29(6): 527
- [33] Wang Bin, Guo Yanbao, Zhang Zheng *et al. Wear*[J], 2023, 518–519: 204648
- [34] Zhou Qing, Ren Yue, Du Yin *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 780: 671
- [35] Ren Yue, Yan Tingyi, Huang Zhuobin *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2023, 134: 33
- [36] Deng Lei, Wang Xinyun, Jin Junsong *et al. Frontiers of Mechanical Engineering*[J], 2018, 13(1): 25
- [37] Kumar M, Sotirov N, Grabner F *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(6): 1257
- [38] Huang Ke, Huang Shiquan, Yi Youping *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 902: 163821
- [39] Weng Zeju, Pan Ran, Liu Baosheng *et al. Ceramics International*[J], 2023, 49(11): 17135
- [40] Gao Yiren, Li Hongxia, Zhao Danyang *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 28: 1538
- [41] Yeh J W, Chen S K, Lin S J *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2004, 6(5): 299
- [42] Cantor B, Chang I T H, Knight P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 375–377: 213
- [43] Ye Y F, Wang Q, Lu J *et al. Materials Today*[J], 2016, 19(6): 349
- [44] Yeh J W, Chen Y L, Lin S J *et al. Materials Science Forum*[J], 2007, 560: 1
- [45] Lu Kaiju, Chauhan Ankur, Tirunilai Aditya Srinivasan *et al. Acta Materialia*[J], 2021, 215: 117089
- [46] Gludovatz B, Hohenwarter A, Thurston K V S *et al. Nature Communications*[J], 2016, 7: 10602
- [47] Liu Dong, Yu Qin, Kabra Saurabh *et al. Science*[J], 2022, 378(6623): 978
- [48] Rackwitz Julian, Yu Qin, Yang Yang *et al. Acta Materialia*[J], 2020, 200: 351
- [49] Ren Yue, Zhou Qing, Hua Dongpeng *et al. Science Bulletin*[J], 2024, 69(2): 227
- [50] Gao Qiuyu, Wei Ran, Feng Shilin *et al. Scripta Materialia*[J], 2023, 228: 115334
- [51] Wu Z, Bei H, Pharr G M *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 81: 428
- [52] Gludovatz Bernd, Hohenwarter Anton, Catoor Dhiraj *et al. Science*[J], 2014, 345(6201): 1153
- [53] Geng Yushan, Liu Jian, Cheng Jun *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2024, 894: 146185

## Research Progress on Cryogenic Tribology of Several Common Metal Materials

Zhu Longhui<sup>1</sup>, Jiao Zhichao<sup>1</sup>, Shi Yeran<sup>1</sup>, Zhou Qing<sup>1</sup>, Ren Yue<sup>2</sup>, Wang Haifeng<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518063, China)

(2. BYD Company Ltd, Shenzhen 518118, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of aviation industry, low temperature superconductivity, hydrogen energy power and other fields has increased the demand for the reliability of equipment operation in low temperature environment. Low temperature will cause the failure of lubricants and the deterioration of mechanical properties of metals, resulting in increasingly terrible lubrication problems. Metal materials are confronted with the severe service environment of dry friction at low temperature. Therefore, the excellent friction and wear performance of the material is a key factor to ensure the long-term stable operation of the mechanical equipment at low temperature. This paper describes the challenges of low temperature lubrication, including low temperature lubrication failure and metal ductile-to-brittle transition. Then we introduce the common low temperature friction environment of metal materials. Finally, the steel, titanium alloy, aluminum alloy and multi-principal element alloy with excellent properties at low temperature are introduced, and the future development trend in this field is prospected.

**Key words:** low temperature; metal material; wear

---

Corresponding author: Zhou Qing, Ph. D., Associate Professor, Shenzhen Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518063, P. R. China, E-mail: zhouqing@nwpu.edu.cn